



Георги Симеонов Добрев

ПРИЛОЖЕНИЯ НА ЛАЗЕРНАТА СПЕКТРОСКОПИЯ ЗА КОХЕРЕНТНО МАНИПУЛИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИЗБРАНИ СЪСТОЯНИЯ НА АТОМИ И МОЛЕКУЛИ

Научна специалност: 4.1 Физически науки Физика на атомите и молекулите

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен "доктор"

Научни ръководители:

проф. дфзн Асен Пашов Dr. Patrick Crozet

Рецензенти: проф. дфзн Кирил Благоев доц. д-р Петър Иванов

> София 2016

Дисертационният труд е обсъден на катедрен съвет в катедра *Оптика и спектроскопия* на Физически факултет, Софийски университет "Св. Климент Охридски", състоял се на 08/04/2016 г., и насочен за защита пред жури в състав:

доц. д-р Петър Иванов, Физически факултет, Софийски университет "Св. Климент Охридски"

проф. дфзн Асен Пашов, Физически факултет, Софийски университет "Св. Климент Охридски"

проф. дфзн Кирил Благоев, Институт по физика на твърдото тяло, Българска академия на науките

Amanda Ross, Directrice de Recherche CNRS/Université Claude Bernard Lyon 1, Лионски университет, гр. Лион, Франция

Jin Yu, Professor, Université Claude Bernard Lyon 1, Лионски университет, гр. Лион, Франция

Дисертантът е редовен докторант под двойно научно ръководство към катедра *Оптика и спектроскопия* на Физически факултет, СУ "Св. Климент Охридски" и към Лионския университет–Université Claude Bernard Lyon 1, гр. Лион, Франция.

Изследванията по дисертацията са проведени в три различни научни лаборатории– Лаборатория по атомна и молекулна спектроскопия към Физическия факултет на СУ "Св. Климент Охридски", Лаборатория по молекулна спектроскопия към Лионския университет - Université Claude Bernard Lyon 1 в гр. Лион, Франция и Лаборатория за честотни измервания към Департамента за честотни еталони към немския институт по метрология – Physikalisch-Technische Bundesanstalt в гр. Брауншвайг, Германия.

Брой страници – 159 Брой фигури – 67 Брой таблици – 6 Брой цитирани литературни източници – 152

Публичната защитата на дисертационния труд ще се проведе на г. от часа в зала на Физически факултет на Софийски университет "Св. Климент Охридски", бул. "Джеймс Баучер" 5.

Съдържание

| Ι | Кохерентно манипулиране на калциеви атоми | 7 |
|----------|--|-----------|
| 1 | Експеримент | 9 |
| | 1.1 Източник на калциеви атоми | 10 |
| | 1.2 Лазерна система и детектор | 11 |
| | 1.3 Детекция на ⁴⁰ Са атоми | 12 |
| | 1.4 Заключение | 14 |
| II | Подобряване на стабилността на цезиев фонтанен ча- | 15 |
| U | эвник с добавянето на спон от бавни атоми вутэ | 10 |
| 2 | Зареждане на оптичната меласа с бавен атомен сноп | 18 |
| | 2.1 Оптимизация на работата на LVIS | 19 |
| | 2.2 Оценка на параметрите на бавния атомен сноп | 21 |
| 3 | Заключение | 23 |
| Π | І Експериментално изследване на фактори на Ланде | |
| 38 | а радикали на метални хидриди | 24 |
| 4 | Нов източник на метални хидриди | 27 |
| 5 | Лазерна спектроскопия в FeH | 31 |
| 6 | Повишаване на чувствителността на лазерния спектрометър. Сау | ity |
| | Ring-Down техника. | 35 |
| 7 | Заключение. Бъдещи планове. | 37 |

Увод

Кохерентността е едно от основните свойства на материята, но нейната проява, обикновено, се размива поради статистическо осредняване на различни взаимодействия между околната среда и разглежданата система. Пробив в експерименталната физика е откритието на лазера като източник на кохерентно лъчение, което направи възможни появата на холографията, оптичните комуникации, честотната метрология, прецизната спектроскопия и много други. Друго значимо достижение е създаването на кондензат на Бозе-Айнщайн и атомния лазер, в които се наблюдава кохерентно състояние на материя с макро размери. Кохерентността лежи, също така в основите на квантовата криптография, квантовите компютри, квантовите симулации и други.

Кохерентността може да бъде разбирана и в по-широк смисъл, а именно като състояние на системата, чиято еволюция е свободна от външни пертурбации. В този случай може да се наблюдават смесени и сплетени състояния на системата, които са съществени за разбирането на заобикалящия ни свят на микроскопично ниво.

Тази дисертация е посветена на експериментално изследване на малки квантови системи (атоми и молекули), при което важно място заема кохерентното манипулиране на състоянията на системата. Дисертацията се състои от три основни части.

В първата част е посветена на създаването на експериментална постановка, с помощта на която да се реализират идеи за кохерентно манипулиране на квантови системи с поредица от композитни импулси [1, 2, 3]. Целта е да се приготви квантова система в отнапред зададено състояние с висока степен на достоверност, при което да се минимизира влиянието на нежелани флуктуации на лазерната честота и интензитет, които винаги съпътстват един реален експеримент. Изградената експериментална постановка се състои от честотно стабилизиран диоден лазер и апаратура за атомен сноп. В Глава 1 от дисертацията са разгледани предимствата, които дава атомния сноп, пред експерименти в магнито-оптични или други атомни капани. Като работна среда е избран атома на Са, защото той притежава метастабилно ниво $4^3 P$ с време на живот 0.4 ms, което дава възможност в рамките на това време атомите в снопа да бъдат разгледани като свободни от взаимодействие с външния свят. Колимираният сноп от атоми пресича поредица от лазерни снопове с контролируема фаза, които са виждат от всеки атом като серия от импулси. В Глава 2 е описано изграждането на експерименталната апаратура и успешната регистрация на интеркомбинационния преход в ⁴⁰Ca ¹S-³P. За съжаление работата по тази задача бе прекратена поради липсата на национално финансиране на научни проекти през 2010-2012 г.

Във втората част на дисертацията е описана работата по подобряване на стабилността на цезиевия фонтанен часовник CFF2, който се намира в немския институт по метрология (Physikalisch-Technische Bundesanstalt - PTB) в гр. Брауншвайг, Германия. След кратък преглед на принципа на работа на часовника (глави 6.1-6.3), в глави 6.4-6.6 е показано, че при съвремените цезиеви фонтанни часовници единствената възможност за подобряване на тяхната работа е увеличаване на броя на атомите, участващи в цикъла на Рамзи. Тези атоми предварително се захващат в оптична меласа посредством интензивни лазерни снопове, след което се засилват вертикално нагоре към микровълновия резонатор. Оптичната меласа е в състояние да захване само атоми с достатъчно ниски скорости, така че ако тя се зарежда от малкото такива атоми на буферния газ при стайни температури (налягане на наситените пари на цезия около 10^{-6} mbar) зареждането е прекалено бавно.

В рамките на тази работа, апаратурата на цезиевия фонтанен часовник бе допълнена с източник на бавни цезиеви атоми (LVIS), което повиши броят на захванатите от меласата атоми 40 пъти. В глава 7 е описан основният принцип на работа на LVIS. С помощта на няколко лазера, цезиевите атоми от източника са приготвени в състоянието 6 ²S, F = 3. Тези лазери допълнително позволяват да се регулира скоростта на атомите от LVIS, което се оказа от съществено значение за оптималната съвместна работа на LVIS с оптичната меласа.

След успешното инсталиране на LVIS и неговата настройка, в глава 7.5 са показани резултатите от изследване на стабилността на цезиевия фонтанен часовник. Показано е, че с новият източник, относителната стабилност е нараснала около 6 пъти до σ_y (1s) = 2.7×10^{-14} , което го прави един от най-добрите работещи постоянно цезиеви часовници на света [4].

Третата част от дисертацията е посветена на изследване на структурата на метални хидриди – молекули от интерес за астрофизиката. Тази работа започна в София още в началото на докторантурата, паралелно с работата по атомния сноп. Целта беше да се конструира нов газоразряден източник, който да дава високи и хомогенни плътности на метални хидриди в добре дефиниран обем (глава 11). Причината за това беше, че за интерпретация на астрономическите наблюдения са необходими редица експериментални данни за структурата на молекулите, а в съществуващите източници концентрациите са или твърде ниски за извършване на прецизна лазерна спектроскопия, или концентрацията на атомите е нехомогенна, което пречи експериментално да се определят сечения на поглъщане. Допълнително, новият източник трябва да може да работи в силни магнитни полета, защото една от задачите, поставена пред дисертанта е намирането на фактори на Ланде за избрани молекулни състояния.

В глава 12 е описано експерименталното изследване на електонните състояния $F^4\Delta_{5/2,7/2}$ на молекулата FeH включително в регулируеми магнитни полета. Бяха

измерени честотите на голям брой преходи в системата F-X в нулево магнитно поле и в поле до 0.5 T. От наблюдаваното разцепване на линиите на Зееманови компоненти бяха определени факторите на Ланде за съответните молекулни нива. Тези фактори на Ланде дават уникалната възможност да се анализират спектри на FeH, регистрирани в звездни обекти, и да се оцени магнитното поле в тях.

Необходимостта да се регистрират слаби преходи от нива с високи ротационни квантови числа, доведе до разработването на нова експериментална постановка. Източникът за производство на метални хидриди бе поставен в резонатор с висок финес, което доведе до многократно увеличаване на ефективната дължина на поглъщане - така наречената Cavity Ring-Down Spectroscopy (CDRS) техника. Новата експериментална постановка бе успешно изпробвана за изследване на различни изотопомери на NiH и NiD и резултатите за показани в глава 14.

Първи успешни стъпки за регистриране на нова молекула CrH в нашия източник са описани в глава 13.

Към всяка глава има отделен увод и кратка теоретична част, въвеждаща основните понятия, използвани в нея. Литературните източници са цитирани отделно за всяка част. В последната глава на дисертацията са обобщени постигнатите резултати и са формулирани основните приноси на автора.

Част І

Кохерентно манипулиране на калциеви атоми

Експерименталните предизвикателства за постигане на кохерентна еволюция на квантова система са не по-малки от реализирането на кондензат на Бозе-Айнщайн. Причината за това са всевъзможните източници на смущения: спонтанната емисия, удари между частици, взаимодействия с външни полета и т.н. През последните десетилетия физиците успяха да преодолеят тези трудности посредством елегантни техники като спин и фотонно ехо, атомна интерферометрия, оптична ориентация и подредба, адиабатно преминаване, електромагнитно-индуцирана прозрачност и др. [5]. Тези техники промениха коренно представите ни за света и доведоха до експерименти за проверка на парадокса на Подолски-Розен-Айнщайн [6], метода на Рамзи за прецизна спектроскопия [7], прецизната оптична метрология [7], атомните интерферометри и жироскопи [8] и взаимодействието между студени атоми и молекули [9]. Една от областите е и обработката на квантова информация.

Алгоритмите за квантово пресмятане се базират на възможността прецизно да се контролира състоянието на квантови системи (атоми, молекули, фотони). Основните проблеми при това са (i) процесите, водещи до декохерентност, (ii) необходимостта да се достигне висока надеждност при приготвяне на дадено състояние и (iii) възможност за локално адресиране на дадена квантова система [10, 11].

В тази дисертация е започната работа по експеримент, който има за цел да провери техника за надеждно приготвяне на квантовата система в отнапред желано състояние с помощта на серия от композитни импулси [1, 2, 3]. Идеята на авторите е квантовата система да взаимодейства с поредица от лазерни импулси, еднакви по форма, честота и интензитет, но с различна относителна фаза на полето. При определено съотношение на тези фази се показва, че системата преминава в желаното състояние с голяма достоверност, независимо от наличието на малки флуктуации на лазерния интензитет и честота.

За експерименталната проверката на тези идеи бе изградена апаратура за атомен сноп с калциеви атоми. ⁴⁰Са притежава удобен лазерен преход във видимата област, който възбужда метастабилното ³P₁ ниво с време на живот 0.4 милисекунди. Ядреният спин на този изотоп е нула, което прави този атом много близък до идеалната система с две нива. Времето на живот позволява манипулация на атомното състояние достатъчно дълго, при което влиянието на спонтанната емисия може да се пренебрегне. Добре колимираният атомен сноп, от своя страна, осигурява голям поток от "напречно студени" атоми, които на практика не си взаимодействат чрез удари. Експериментите в атомен сноп предлагат и допълнително удобство. Поредицата от лазерни импулси може да се реализира като атомите преминават последователно през няколко непрекъснати лазерни снопа, което не налага бърза промяна на лазерния интензитет във времето.

В глава 2 на дисертацията е описано изграждането на апаратурата за снопа и лазерната система.

Експеримент



Фигура 1.1 Схема на избрани нива и преходи в 40 Са.

Опростена схема на нивата на изотопа 40 Са е показана на фиг. 1.1. Показан е интеркомбинационният преход $4^{1}S_{0} \rightarrow 4^{3}P_{1}$, както и други преходи, удобни за последващо детектиране на състоянието на възбудените атоми.

Вакуумната система на атомния сноп се състои от две камери, изградени от два кръстови вакуумни елемента, всеки с по шест DN160CF фланеца. Камерите са допълнително разделени от вакуумен вентил (виж. 1.2). Една дифузионна и една турбомолекулярна помпа са монтирани в долните портове на камерите. Останалите се използват за вкарване на лазерните снопове, електрически кабели и за закрепване детектиращата система и източника на Са атоми.



Фигура 1.2 Изглед от вакуумните камери на апаратурата за атомен сноп (вакуумните помпи не са показани).

1.1 Източник на калциеви атоми

Точката на топене на Са е $T_{\rm mp} = 842^{\circ}$ [12, р. 4-126] с пренебрежимо налягане на наситените пари при стайна температура, което налага изготвянето на специална пещ, в която да се повиши плътността на атомите. Тази пещ е монтирана на страничния фланец на първата камера (Фиг. 1.2).

В рамките на тази дисертация бяха изработени и изпробвани две конструкции на източници. Първоначалната идея беше да се избегне инсталирането на нагревателни елементи вътре във вакуумната камера и за това беше разработен източникът, показан на фигура 1.3. Източникът е изработен от монолитен цилиндър от неръждаема стомана, завършващ със стандартен KF50 фланец за закрепване към основната вакуумна камера. Нагревателните елементи са извън вакуумната камера, а дюзата, през която излизат калциевите атоми, е изработена в детайла, с който се затваря резервоара с калций. За съжаление тази конструкция се оказа неудачна, защото в процеса на работа дюзата се запушваше от полепнали по нея калциеви кристали (Фигура 1.4). Въпреки възможностите за оптимизация, работата с този източник бе преустановена.

Вторият източник отчете недостатъците на първия и имаше доста по-сложна конструкция – Фиг. 1.5.

Резервоарът (1) е изработен от неръждаема стомана. От едната страна на резервоара е разпробита дюзата (4), а от другата е изработен стандартен CF25 фланец (2) за затваряне на обема. Резервоарът е поставен в меден блок, заедно с две двойки нагреватели. Те осигуряват необходимата работна температура (око-



Фигура 1.3 Схема на първия източник на калциеви атоми.

Фигура 1.4 Снимки на калциеви кристали, полепнали по дюзата на източника.

ло 900 K), като посредством втората двойка, температурата на дюзата винаги се подържа по-висока от тази на резервоара и така се избягва нейното запушване. Излъчването на нагретия меден блок би смущавало детектиращата система, затова медният блок е поставен в екран, изработен от полирана неръждаема стомана (8). Подробности за конструкцията може да се намерят в глава 2.3 на дисертацията.



Фигура 1.5 Схема на втория източник на Са атоми (а) и снимка на неговите части (б).

1.2 Лазерна система и детектор

Разработената лазерна система (глава 2.4) се състои от диоден лазер с външен резонатор. Лазерният диод ¹ е с мощност 50 mW при 660 nm. Външният резонатор е реализиран с дифракционна решетка, поставена в схема на Литров [13]. Пренастройката на лазера става посредством температурата и синхронна

 $^{^{1}\}mathrm{HL6544FM}$

промяна на лазерния ток и завъртане на дифракционната решетка. Очакваната ширина на лазера без активна стабилизация е под 1 MHz.

Калциевите атоми си взаимодействат с лазерното лъчение във втората вакуумна камера. Лазерните снопове преминават през специални отвори в двата странични фланеца на камерата, снабдени с прозорци под ъгъл на Брюстер и екрани, предпазващи детектора от лазерна светлина, разсеяна от прозорците.

Детекторът е фотоумножител ФЭУ-79, монтиран на фланеца, срещуположно на атомния източник. Този монтаж е нестандартен. Обикновено детекторът е поставен перпендикулярно на лазерите и атомния сноп, защото по този начин се избягва светлината от нагретия източник. Предимството на настоящия монтаж е, че позволява да наблюдава флуоресценцията по цялата дължина на снопа, след възбуждането с лазерите. Това е необходимо, защото възбудените калциеви атоми са с време на живот около 400 μ s и за това време изминават път от няколко десетки сантиметри преди да излъчат.

За регистрация единствено на лазерноиндуцираната флуоресценция са взети мерки за блокиране на излъчването на нагретия източник, пред детектора поставен е интерференчен филтър, центриран около 656 nm и флуоресценцията се наблюдава с фазовочувствителен усилвател, като лазерният интензитет е модулиран механично. Допълнително са взети мерки за намаляване на разсеяната лазерна светлина от прозорците посредством серия от почернени екрани.

1.3 Детекция на ⁴⁰Са атоми

На фигура 1.6 е показана схема на цялата експериментална постановка. За контрол и калибровка на лазерната честота по време на експеримента, част от лазера е насочен към специално изградена система. Тя се състои от конфокален интерферометър с област на свободна дисперсия около 395 MHz, уред за измерване на лазерната честота с абсолютна точност около 3 GHz и система за абсорбционна спектроскопия на молекулен йод. Познаването на молекулния спектър на йода с точност $\approx \pm 0.003 \, \mathrm{cm}^{-1}$ [14] позволява калибрирането на записания спектър на флуоресценция от Са атоми с абсолютна точност от същия порядък.



Фигура 1.6 Схема на експерименталната постановка.

На фигура 1.7 е показана със син цвят регистрираната лазерно-индуцираната флуоресценция от 4³P състоянието на ⁴⁰Ca заедно със сигнал от конфокалния интерферометър (сив цвят). Вижда се, че ширината на регистрираната линия е около 30 MHz, което се дължи предимно на остатъчната Доплерова ширина на атомната линия поради недостатъчната колимация на снопа. Възможно е, също така, лазерните снопове да не са строго перпендикуляни на атомния сноп, което също би довело до допълнителна Доплерова ширина на регистрираната линия.



Фигура 1.7 Регистрирана
лазерно-индуцирана флуоресценция от 4^3 Р състоянието на
 40 Са.

1.4 Заключение

Представените резултати показват, че изработената апаратура за атомен сноп работи. Предстои да се подобри колимацията на снопа и настройка на лазерните снопове за минимизиране на ефекта на Доплер. Необходимо е да се изследва ширината на лазерната линия и да се осигури ширина под 1 kHz в рамките на времето на взаимодействие (няколко микросекунди). Следващата стъпка е да се разделят лазерните снопове и атомите да взаимодействат с 3 или 5 снопа. Фазата на всеки от тях ще се регулира с електрооптичен модулатор. За съжаление работата в тази насока бе отложена поради липсата на национално финансиране на научните изследвание в България в периода 2010 – 2012 г.

Част II

Подобряване на стабилността на цезиев фонтанен часовник с добавянето на сноп от бавни атоми LVIS

Успехите в квантовата физика, довели до кохерентно манипулиране на атомни състояния, позволиха създаването на прецизни атомни часовници, които промениха дефиницията на мерните единици за дължина и време. Нещо повече съвременните атомни часовници достигат относителна неопределеност при измерване на честота от 10^{-18} , което позволява да се провеждат немислими преди експерименти, проверяващи нови предположения във физиката, например за съществуването на електричен диполен момент на електрона, промяна на физичните констнанти във времето и други.

В съвременната физика единицата за време се дефинира чрез периода на осцилация на електромагнитното поле, възбуждащо преход между двете свръхфини компоненти на основното състояние на цезиевия атом ¹³³Cs. В основата на всеки съвременен цезиев часовник лежи двукратното взаимодействие на атомите с електромагнитното поле – така нареченият метод на Рамзи [7]. Допълнително, значително повишаване на точността на часовника се постига, когато атомите са транслационно студени. От една страна това води до по-голямо време между двата импулса на Рамзи, от друга – намалява се неопределеността на измерваната честота на Раби, тъй като тя зависи от времето за преминаване на атомите през резонатора.

Във фонтанния часовник CSF2, атомите първоначално се захващат в оптична меласа в основното състояние с F = 4. След това ансамбъла бива "изстрелян" вертикално нагоре. При полета си нагоре, атомите взаимодействат първо с микровълново поле (state selection cavity), а в последствие и с лазер. Целта е в летящия облак да останат само атоми приготвени в F = 3 свръхфина компонента на основното състояние. След това, атомите преминават през резонатора на Рамзи и, след достигане на максимална височина от около един метър, падат гравитационно и преминават отново през микровълновия резонатор. Прелитаците атоми виждат микровълновото поле като два $\pi/2$ импулса. В зависимост от честотата на полето, вероятността атомите да са преминали в свръхфината компонента с F = 4 осцилира, това са така наречените осцилации на Рамзи (виж фигура 1.8). С резонансен лазер се проверява каква част от атомите е преминала в състояние с F = 4. Резонансната честота на прехода $F = 4 \rightarrow F = 3$ съвпада с централния максимум от фигура 1.8 и именно по тази линия се стабилизира микровълновият генератор.

Съотношението сигнал към шум (SNR) на осцилациите на Рамзи е очевидно съществен фактор за стабилността на атомния часовник. В глава 6.5 от дисертацията е показано, че стабилността на часовника зависи от броя на атомите N, участващи в цикъла на Рамзи, като $N^{1/2}$. Оттук следва и основната мотивация на тази част от дисертацията – да се увеличи броят на атомите в оптичната меласа без това да доведе до увеличаване на времето за тяхното зареждане (няколко стотин милисекунди).



Фигура 1.8 Измерените Рамзи-осцилации от фонтанния часовник CSF2 в РТВ.

Зареждане на оптичната меласа с бавен атомен сноп

Атомите в оптичната меласа се зареждат от бавните атоми в наситените цезиеви пари във вакуумната камера, които имат Болцманово разпределение по скорости. При параметрите на оптичната меласа на CSF2 за около 1 s в нея се събират около 10⁵ атома. За увеличаване на този брой към вакуумната камера е инсталиран сноп от бавни цезиеви атоми (LVIS, описан подробно в Глава 7). Този сноп е насочен към работния обем на меласата и скоростта на атомите трябва да е оптимална, така че максимален брой от тях да бъде захванат в меласата.

LVIS предствлява традиционен магнито-оптичен капан (MOT), в който атомите биват охладени чрез разсейване на резонансни фотони в присъствието на подходящо подбрано магнитно поле. Температурата на атомите може да достигне до μ K. Ако в едно от огледалата на MOT се направи малък отвор (фигура 2.1), по оста, перпендикулярна на отвора, охлаждащата сила няма да е балансирана и охладени атоми, попаднали по тази ос, ще бъдат "избутвани" от охлаждащия лазер (обозначен с cool) през отвора и могат да бъдат доведени до обема на оптичната меласа.



Фигура 2.1 Схема на бавния атомен сноп LVIS.

При така направения LVIS, обаче, атомите ще бъдат постоянно ускорявани от небалансирания охлаждащ лазер по оста z, защото атомите в МОТ са захванати в свръхфината компонента F = 4 на 6²S състоянието, фигура 2.2. Затова съществуващата схема на LVIS бе модифицирана, като по оста z на снопа бе

премахнат изпомпващия лазер (repumper) и бе поставен допълнителен напомпващ лазер (pump), който е настроен в околността на прехода $F = 4 \rightarrow F' = 3$ и прехвърля атомите от състояние с F = 4 в F = 3 след спонтанен разпад на възбуденото състояние. Това става извън областта на действието на изпомпващия лазер, който действа от двете перпендикулярни направления в МОТ. Времето, за което напомпващият лазер ще прехвърли атомите в състояние с F = 3 зависи от интензитета му, както и от неговата честота, затова този лазер не е настроен точно в резонанс с прехода $F = 4 \rightarrow F' = 3$. На оптимизация на източника на бавни атоми са посветени глави 7.2 и 7.3 от дисертацията.



Фигура 2.2 Схема на нивата $6^2 S_{1/2}$ и $6^2 P_{3/2}$ и преходите, имащи отношение към източника на бавни атоми LVIS.

2.1 Оптимизация на работата на LVIS

Оптималната работа на източника на бавни атоми е този, при който в оптичната меласа на цезиевия часовник се зарежда максимален брой атоми. Затова оптимизацията на LVIS е проведена съвместно с работещия фонтанен часовник. При оптимизацията е инсталиран допълнителен пробен лазер (фигура 2.1) между източника и оптичната меласа.

На фигура 2.3 е показан регистрираният брой атоми в оптичната меласа $N_{\rm at}$, зареждана с LVIS източника като функция на честотата на пробния лазер. По абсцисата е показана разликата между честотата на лазера и тази на: (a) $|F = 3\rangle \rightarrow |F'\rangle$ и (b) $|F = 4\rangle \rightarrow |F'\rangle$ преходите. С червено (долния сигнал) е показана зависимостта без напомпващ лазер, а със зелено (горната) – с него. И в двата случая (a) и (b) напомпващият лазер възбужда $|F = 4\rangle \rightarrow |F' = 3\rangle$ прехода. Със сив цвят е показан профила на D_2 линията, получен с наситена спектроскопия, за да може читателят да се ориентира на кои преходи съответстват особеностите в получените сигнали.



Фигура 2.3 Регистрираният брой атоми в оптичната меласа $N_{\rm at}$, зареждана с LVIS източника като функция на честотата на пробния лазер. По абсцисата е показана разликата в честотите на лазера и тази на: (a) $|F = 3\rangle \rightarrow |F'\rangle$ и (b) $|F = 4\rangle \rightarrow |F'\rangle$ преходите.

От фигура (a) се вижда, че без напомпващ лазер броят на атомите почти не зависи от честотата на пробния лазер, това е защото всички те са предимно в състояние с F = 4. Когато напомпващия лазер е включен, броят на захванатите атоми нараства почти два пъти, но когато честотата на пробния лазер съвпадне с някой от преходите от F = 3 – броят им намалява, очевидно защото те са в състояние с F = 3 и пробния лазер ги ускорява и извежда от снопа. По същия начин може да бъдат обяснени резултатите, когато пробният лазер възбужда преходи от F = 4. Без напомпващ лазер броят на атомите е два пъти по-малък и когато пробния лазер е в резонанс, той се променя. С напомпващ лазер броят на атомите е голям и постоянен, защото те са в състояние с F = 3 и не си взаимодействат с пробния лазер.

На фигура 2.4 е показана зависимостта на броя регистрирани атоми $N_{\rm at}$ като функция на честотата при четири интензитета на напомпващия лазер. За сравнение с пунктирна линия е показан броя атоми, зареден в меласата без LVIS. При малки лазерни интензитети се вижда, че броят атоми е максимален при честота на напомпващия лазер, съвпадаща с прехода $|F = 4\rangle \rightarrow |F' = 3\rangle$. С повишаване на интензитета, оптималната честота се отмества, а зависимостта на броя атоми от честотата придобива сложна форма, анализирана в детайли в глава 7.3. В съ-



Фигура 2.4 Зависимост на броя регистрирани атоми $N_{\rm at}$ като функция на честотата и интензитета на напомпващия лазер.

щата глава е анализирана зависимостта на броя регистрирани атоми от честотата на изпомпващия лазер на LVIS.

2.2 Оценка на параметрите на бавния атомен сноп

Основни параметри на всеки атомен сноп са надлъжната скорост на атомите и нейното разпределение и генерирания поток от атоми. Те са оценени в глава 7.4 от дисертацията.

На фигура 2.5 е представен ходът на нарастване на броя атоми в меласата без и с източника на бавни атоми. Във втория случай (горния син сигнал) атомите от VLIS са отклонени по пътя им към меласата с помощта на резонансен лазер (тази роля изпълнява пробният лазер със значително повишен интензитет), който се изключва в момента t = 0 s. Вижда се, че първоначално броят атоми нараства по-бавно, защото нарастването се дължи само на малка част от атомите в снопа, които не са ефективно отклонени от пробния лазер. След около 50 ms основната група атоми достига до меласата, след което броят нараства линейно. В глава 7.4 е разработен модел, който описва получените експериментални зависимости и от него следва, че средната скорост на атомите в снопа е 8.682 ± 0.04 m/s, а ширината е 2.00 ± 0.01 m/s (предполага се, че атомите имат нормално разпределение по



Фигура 2.5 Скорост на зареждане на атомите в оптичната меласа (OM) с и без LVIS.

скорости, чието стандартно отклонение е оценено на 0.01 m/s).

В глава 7.4 е оценен е също така потокът на атомите в снопа. Това е направено чрез измерване на поглъщането от атомите в меласата и е получена стойност около 10^8 атома/s.

Заключение

С използването на LVIS броят атоми, заредени в оптичната меласа на CSF2, е увеличена близо 40 пъти. Това би трябвало да увеличи честотната стабилност на часовника над $\sqrt{40}$ пъти.

На фигура 3.1 е показано стандартното отклонение на Алан за CSF2 с използване на източника на бавни атоми. Вижда се, че експерименталните точки лежат на права, отговаряща на честотна стабилност от $\sigma_y(\tau) = 2.7 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$, където τ е времето за осредняване. Това наистина е очакваното подобрение от около 6 пъти в сравнение с CSF2 без LVIS. При време на осредняване над 200 секунди се достига относителна стабилност под 2×10^{-15} , което е съизмеримо с най-добрите цезиеви часовници в света. Преди инсталирането на снопа бавни атоми, CSF2 достигаше това ниво на стабилност след осредняване в продължение на няколко часа.



Фигура 3.1 Стандартно отклонение на Алан на честотата на CSF2.

Част III

Експериментално изследване на фактори на Ланде за радикали на метални хидриди

Металните монохидриди са едни от най-разпространените молекули в студените звездни обекти. Ивици на FeH, CrH, NiH са открити в абсорбционните спектри на студени звезди [15], както и в слънчевите петна. Поради своята енергетична структура тези молекули може да бъдат ценен източник на информация за отдалечените космически обекти. По разпределението на интензивностите на молекулните линии може да се съди за температурата на молекулите, а от тяхното разширение поради ефекта на Зееман – за магнитните полета, в които се намират.

За интерпретацията на звездните спектри очевидно е необходимо познаване на честотите на молекулните преходи, сеченията на поглъщане, факторите на Ланде и друга информация, която може да бъде получена единствено в предварителни лабораторни изследвания.



Фигура 3.2 Сравнение на спектърът на поглъщане на FeH от слънчево петно (b) с лабораторен спектър при стайни температури, получен в тази работа (c). Най-горния спектър (a) е симулирания спектър при 3300 K, ползващ експериментални данни от досега съществуващи измервания.

На фигура 3.2 е показана ивицата на Wing-Ford в FeH, измерена в слънчево петно (b) [16] и лабораторен спектър при стайни температури и нулево магнитно поле, получен в тази работа (c). Най-горния спектър (a) е симулирания спектър при 3300 K, ползващ експериментални данни от досега съществуващи измервания [17]. Вижда се, че част от линиите от слънчевия спектър са разширени поради магнитните полета в петното, също така че предсказаните в [17] честоти и интензивности на линиите не съвпадат напълно с наблюдаваните.

Въпреки огромният интерес към металните хидриди, лабораторните данни за тях далеч не са пълни. Трудностите са преди всичко в получаването на тези молекули в лабораторни условия. Обикновено концентрациите са ниски и е необходимо да се търсят високочувствителни методи на лазерната спектроскопия. От друга страна земните източници на хидриди трябва да позволяват работа в сравнително силни магнитни полета (от порядъка на 0.5 T) и да осигуряват хомогенен поглъщащ обем, за да може да се оценят сеченията на поглъщане и вероятностите за преходи.

И така, една от целите на изследването, представено в дисертацията, е да се разработи нов газоразряден източник за производство на метални хидриди, който да отговаря на тези изисквания. Втората цел е да се приложи високочувствителна лазерна спектроскопия за изследване на F-X ивицата във FeH. Тази ивица лежи в близката инфрачервена област, наблюдава се в повечето звездни обекти и е чувствителна към магнитни полета.

Нов източник на метални хидриди



Фигура 4.1 Схема на разработения в тази работа газорадряден източник за получаване на метални хидриди.

Работата по разработване на нов източник за метални хидриди се базира на опита на групите от Лион [18] и София [19].

Източникът от Лион е описан подробно в глава 12.1 от дисертацията. Той представлява кух катод с малки размери (вътрешен диаметър около 1,2 mm, дължина около 10 mm). Анодът представлява пръстеновиден проводник, разположен на около 7 mm под катода. Създаденият между анода и катода разряд гори в смес от 10% водород и 90% аргон при токове около 200 mA. Катодът е разположен вертикално и получените в процеса на разряда молекули се възбуждат от лазер, няколко mm под анода. Лазерно-индуцираната флуоресценция се детектира с лавинен фотодиод в напречно на зоната на взаимодействие (лазер-молекули) направление. Предимства на този източник са високата плътност на тока, водеща до висока концентрация на молекули в малък обем. При това, сравнително лесно е молекулите да се поставят в хомогенно магнитно поле. Недостатък на този източник е, че обема на молекулите не е добре дефиниран и концентрацията е силно нехомогенна. За това той не може да се използва за определяне на сечения на поглъщане и вероятности на преходи. Допълнително, при провеждане на измервания на лазерно-индуцирана флуоресценция, емисията от разряда често пречи, защото е в същата спектрална област както и флуоресценцията.

Източникът, изработен в рамките на тази работа е показан на фигура 4.1. Той е

базиран на коаксиалната конструкция от работа [19] и е описан подробно в глава 11 на дисертацията. Състои се от цилиндричен катод от изследвания метал, който е в плътен контакт с металните стени на вакуумната камера и може да се охлажда посредством инсталираните в краищата охлаждащи пръстени. Анодите са разположени по оста на цилиндъра. След няколко изпробвани разновидности, в последната конструкция на тръбата те представляват тънки проводници, омотани около две стъклени пръчки. Тръбата е снабдена с два отвора с прозорци под ъгъл на Брюстер и множество вакуумни отвори, през които в камерата се подават работните газове и необходимите работни напрежения. В този вариант на тръбата, магнитното поле се създава от четири електромагнитни намотки, които са поставени по цялата дължина на тръбата.

Предварителните тестове на тръбата бяха направени с катод от никел, защото поглъщането на NiH е добре известно и попада в областта на генерация на диодни и багрилни лазери.



Фигура 4.2 Схема на опитната постановка за детекция на поглъщане в NiH. L-леща; BS-светоделител, М-огледало.

Схема на опитната постановка за детекция на поглъщане в В-Х ивицата на NiH е показана на фигура 4.2. В София вместо багрилен беше използван диоден лазер, генериращ на 650 nm. Той възбужда преходи от v'' = 0 до v' = 0 в В състоянието, докато багрилният лазер с Rhodamine 6G възбужда прехода $v'' = 0 \rightarrow v' = 1$, който е на порядък по силен. Оптичните сигнали са регистрирани със силициеви фотодиоди в диференциална схема и се събират в компютър посредством специализирана платка за обработка на данни (DAQ). За контрол и калибровка на лазерната честота е използвана традиционна система от конфокален интерферометър, кювета с йодни пари и измерител на оптична честота (ламбдаметър).

На фигура 4.3 е показан примерен спектър на поглъщане в NiH без магнитно поле (а) и с магнитно поле (b). Възбуден е преходът Q(2.5) от вибрационната ивица (1-0) между електронните състояния $B^2\Delta_{5/2} - X^2\Delta_{5/2}$. Трите спектрални линии отговарят на трите най-разпространени изотопомера на никеловия хидрид. Освен поглъщането на NiH, на графиката са показани поглъщането на йодна-



Фигура 4.3

та молекула и максимумите на конфокалния интерферометър на Фабри-Перо с област на свободна дисперсия 1.5 GHz. Най-силният пик, на ⁵⁸NiH, отговаря на поглъщане от около 0.1 %. При съотношение на сигнала към шума около 20 за единичен скан, това показва, че този газоразряден източник заедно със събраната детектираща система са в състояние да детектират много малки поглъщания. Тъй като конструкцията на тръбата предполага хомогенен стълб от поглъщащи молекули с добре дефинирана дължина, този източник е много подходящ за провеждане на измервания за определяне на сечения на поглъщане.

На фигура 4.3(b) е показан същият спектър, но в магнитно поле от около 0.1 Т. В глава 11.3 на дисертацията е показано как е намерена зависимостта между магнитното поле и тока между намотките. Магнитното поле е по оста на тръбата и при линейна поляризация на лазера, перпендикулярна на полето, това води до възбуждане на преходи от σ^+ и σ^- компонентите на лазера. Поради ефекта на Зееман, спектралните линии се разцепват, като на спектъра това се вижда частично поради значителната ширина на спектралните линии, превишаваща Зеемановото разцепване.

В заключение би могло да се каже, че е предложена една удачна конструкция на източник на метални хидриди. Този източник може да се използва за определяне на сечения на поглъщане посредством абсорбционна спектроскопия, защото предлага хомогенен стълб от молекули с добре дефинирана дължина. Постигнатите магнитни полета за сега достигат 0.1 T, което е недостатъчно за пълното разцепване на линиите на повечето метални хидриди, но това може да бъде преодоляно като магнитните намотки се заменят с постоянни неодимови магнити. Възможно е също така да се работи в импулсен режим на работа на разрядния ток, така че за кратко време да се получава висока концентрация на молекули, без да се натоварва термично катода и охлаждащата система.

ЛАЗЕРНА СПЕКТРОСКОПИЯ В FEH

Една от поставените задачи в тази дисертация беше да се измерят честотите на преходи в F-X системата на FeH и да се определят факторите на Ланде за нива с възможно най-голямо ротационно квантово число J.



Фигура 5.1 Обща схема на кухокатодния източник (a) и магнитовода (b).

Експериментът бе проведен в Лион с кухокатодния източник от [18], защото той позволява прилагането на по-силно магнитно поле. Той е описан в глава 12.3 от дисертацията. Магнитното поле е създадено от постоянен неодимов магнит и е концентрирано в областта на взаимодействие с лазерното лъчение посредством магнитовод (виж фигура 5.1). В този случай магнитните силови линии са перпендикулярни на лазерния лъч, чиято поляризация може да бъде променяна. Когато поляризацията е перпендикулярна на полето, Зеемановото разцепване на линиите се дължи на преходи, възбудени от σ^+ и σ^- компонентите на лазерното поле в мястото на наблюдение в източника достига до 0.5 Т и е калибрирано по известното Зееманово разцепване на аргонови линии, които бяха наблюдавани в кухокатодния източник.

Първоначално бе проведена серия от измервания без магнитно поле. Експерименталната постановка е подобна на тази от фигура 4.2 с тази разлика, че като лазерен източник бе използван непрекъснат и едномодов титан-сапфиров лазер, генериращ в областта около 1 μ m. Този лазер възбужда преходи в F-X системата на FeH. Във възбуденото F⁴ Δ състояние бяха наблюдавани преходи до две от спин-орбиталните компоненти F⁴ $\Delta_{5/2}$ и F⁴ $\Delta_{7/2}$. Преходите започват от вибрационно квантово число v'' = 0 на компонентите на основното състояние X⁴ $\Delta_{5/2}$ и $X^4 \Delta_{7/2}$ и достигат до вибрационни квантови числа v' = 0 и v' = 1 във възбудените състояния. Детектирана беше лазерно-индуцираната флуоресценция посредством лавинен силициев фотодиод. За да бъде избегнато влиянието на светлина от разряда, интензитетът на лазера бе модулиран с механичен прекъсвач и детекцията бе осъществена с фазовочувствителен усилвател.



Фигура 5.2 Сравнение на експерименталния профил на линията R(8.5) от F–X системата на ⁵⁶FeH в магнитно поле и модела.

На фигура 5.2 са показани двете компоненти на линията R(8.5) без (горния спектър) и в (долния спектър) магнитно поле. Поляризацията на лазера е перпендикулярна на магнитното поле, затова електромагнитното поле може да се представи като комбинация от σ^+ и σ^- компоненти. Без магнитно поле линиите са добре разделени и тяхната централна честота може да бъде определена с точност около 0.002 сm⁻¹. В магнитно поле двете линии се разцепват и когато отделните Зееманови компоненти, отговарящи на $\Delta M = \pm 1$, са напълно разделени, компонентите от σ^+ и σ^- поляризациите започват да се припокриват спектрално. Това се вижда на най-долната част на фигурата, около 11485.5 сm⁻¹.

За това, за определяне на факторите на Ланде е необходимо да се разработи програмен код, който да моделира профилите на наблюдаваните линии в магнитно поле и, използвайки честотите на преходите и относителните интензивности на отделните Зееманови компоненти като входни данни, да напасва факторите на Ланде, така че да се търси максимална близост между измерения и симулирания спектър. Такъв код беше създаден в програмната среда IgorPro и на фигура 5.2 върху експерименталния спектър е наложен резултата от симулацията, като възпроизводимостта е много добра, с изключение на интензитетите на Зеемановите компоненти с голямо магнитно квантово число M_J .

Така разработения програмен код работи успешно и в много по-сложни случаи, като например този, показан на фигура 5.3. Тук в рамките на 1.5 сm⁻¹ са наблюдавани няколко спектрални линии (Fig. 5.3(a)) и в магнитно поле Зеемановите им компоненти напълно се припокриват. На фигурата е показано разцепването на отделните Зееманови компоненти за всяка линия (Fig. 5.3(c)) и общия симулиран спектър (линията със син цвят на Fig. 5.3(c)), сравнен с експериментално получения (линията с оранжев цвят на Fig. 5.3(b)).



Фигура 5.3 Сравнение на експерименталния профил, състоящ се 7 линии от Q ивицата на F–X системата на ⁵⁶FeH в магнитно поле и модела. Трите спектрални линии, отбелязани със звезда, не са включени в симулацията. Те отговарят на преходи на изотопомера 54 FeH.

В резултат от направените измервания на линии от ивицата F-X в FeH без магнитно поле и въз основа на анализа на експерименталните данни бяха намерени енергиите на 33 нива от възбуденото състояние $F^4\Delta$, обхващащи вибрационни квантови числа 0 и 1 и ротационни квантови числа, достигащи до 10.5, което е значително подобрение в сравнение с предишните експериментални изследвания [20].

При повтаряне на същите измервания в магнитно поле, бяха определени фактори на Ланде за съответните енергетични нива от възбуденото състояние с относителна неопределеност около 1 %. Част от предишните експериментални стойности бяха коригирани [20].

В глава 12.4 от дисертацията е анализирана зависимостта на експерименталните фактори на Ланде от ротационното квантово число J. Показано е, че тази зависимост не отговаря на теоретично очакваната нито за случай (a), нито за случай (b) по Хунд. Това показва, че електронните състояния F и X са обект на силни пертурбации и не могат да бъдат описани като чисти състояния по Хунд. Следователно не е възможно напълно да се разчита на теоретично пресметнатите фактори на Ланде, а е необходимо да се провеждат допълнителни измервания както на останалите спин-орбитални компоненти на състоянията $X^4\Delta$ и $F^4\Delta$, така и на още по-високи ротационни квантови числа, които обикновено се наблюдават в спектрите на студените звезди.

Повишаване на чувствителността на лазерния спектрометър. Cavity Ring-Down техника.

Едно от предизвикателствата към "лабораторната астрофизика" е трудността да се снемат спектри в условия, близки до тези в звездните обекти. Така например, високите температури от няколко хиляди келвина водят до термично заселване на енергетични нива с високи ротационни квантови числа. В лабораторни условия, заселеността на тези нива е много ниска и съответстващите им спектрални линии са много слаби.

Необходимостта да се регистрират слаби преходи от нива с високи ротационни квантови числа, доведе до разработването на нова експериментална постановка. Източникът за производство на метални хидриди бе поставен в резонатор с висок финес, което доведе до многократно увеличаване на ефективната дължина на поглъщане - така наречената Cavity Ring-Down Spectroscopy (CDRS) техника. Новата експериментална постановка бе успешно изпробвана за изследване на различни изотопомери на NiH и NiD и резултатите за показани в глава 14.

На фигура 6.1 е показан спектър на поглъщане на P(7.5) линията за B-X (0–0) ивицата в NiD. Виждат се всичките четири изотопомера на NiD. Съотношението сигнал към шум е много добро, което може да се сравни с това при еднопроходните измервания (сравни с фигура 4.3(а)). Ползата от прибягването до техниката CRDS е очевидна. Предстои прилагането и за FeH и CrH. Първи успешни стъпки за регистриране на новата молекула CrH в кухокатодния източник са описани в глава 13.



Фигура 6.1 CRDS скан на прехода в NiD B-X (0-0) P(7.5). Виждат се добре разделените компоненти P_e , P_f (7.5) в ⁵⁸NiD, ⁶⁰NiD, ⁶⁰NiD и ⁶²NiD.

Заключение. Бъдещи планове.

В резултат от работата по тази част на дисертацията беше разработен нов газоразряден източник, който осигурява хомогенен стълб от молекули с добре дефинирана дължина, т.е. добри условия за определяне на сечения на поглъщане. Източникът може да работи в магнитно поле, като в момента са достигнати стойности от 0.1 Т. Предложени са по-нататъшни модификации за подобряване на работните условия.

Реализирана е серия от измервания на ивицата F-X във FeH [21]. Определени са енергиите на 33 нива от възбуденто F състояние с вибрационни квантови числа 0 и 1 и ротационни квантови числа, достигащи до 10.5. За всичките тези нива са определени факторите на Ланде с относителна експериментална грешка около 1 %. Тези измервания значително подобряват експерименталните знания за тази молекула и биха могли да бъдат използвани за интерпретацията на астрономически наблюдения от студени звезди или слънчеви петна.

Натрупаният опит при спектроскопията на метални хидриди подсказва няколко възможности за подобряване на възможностите на съществуващите експериментални постановки. От една страна това е увеличаването на концентрацията на молекулите посредством повишаване на разрядния ток или прилагането на импулсен режим на работа. Друга възможност е да се се повиши чувствителността на лазерния спектрометър като газоразрядния източник се постави в резонатор, което значително повишава оптичния път и, следователно, поглъщането. Предварителни измервания по тази схема бяха направени в работа [22] с прилагане на така наречената Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS) техника.

Заключение и научни приноси

В рамките на тази дисертация бе работено по три научни проекта, посветени на кохерентното изследване и манипулиране на атомни и молекулни състояния.

Първият проект бе посветен на изграждане на експериментална апаратура, с помощта на която да бъдат проверени идеите за кохерентно манипулиране на състоянието на малки квантови системи с две нива с поредица от композитни импулси [1, 2, 3]. Бяха изградени апаратурата на атомен сноп, работещ с калций, и лазерната система, необходима за експеримента. Работата на апаратурата беше демонстрирана чрез измерване на интеркомбинационния преход в ⁴⁰Ca. Работата по проекта бе отложена поради прекратяването на финансирането на научни проекти през периода 2010 г. – 2012 г.

Вторият проект бе посветен на подобряване на стабилността на фонтанните цезиеви часовници. Това бе направено като към апаратурата на атомния часовник CSF2 бе добавен източник на бавни цезиеви атоми (low-velocity intense source -LVIS). С помощта на този източник бе увеличен броят на заредените в оптичната меласа на часовника атоми близо 40 пъти при същото време за зареждане. Това подобри стабилността на часовника около 6 пъти и бе достигната стабилност $\sigma_y(\tau) = 2.7 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$, където τ е времето за осредняване. Тези резултати бяха постигнати след внимателен анализ на работа на цезиевия фонтан и оптимизиране на квантовото състояние на атомите, излизащи от LVIS [4].

Третият проект е от областта на молекулната спектроскопия с висока разделителна способност. Задачата беше да се опише енергетичната структура, включително факторите на Ланде, на избрани състояния на молекулата FeH, което е от пряк интерес за астрофизични наблюдения. За целта, в рамките на дисертацията беше разработен нов източник за производство на метални хидриди, осигуряващ хомогенен стълб от молекули с добре дефинирана дължина, който може да работи и в магнитни полета. Работата на източника беше демонстрирана при наблюдаване на поглъщане в NiH молекули. За съжаление, големината на магнитното поле, която бе постигната със системата от електромагнити позволи наблюдаване само на частично разделени магнитни преходи в молекулата NiH. Затова изследванията на енергетичната структура на ивицата F-X във FeH бяха проведени в друг газоразряден източник. Той е използван и в предишни експериментални изследвания на молекули на метални монохидриди от групата

в Лион.

Определени са енергиите на 33 нива от възбуденото F ${}^{4}\Delta$ с вибрационни квантови числа 0 и 1 и ротационни квантови числа, достигащи до 10.5. За всичките тези нива са определени факторите на Ланде с относителна експериментална грешка около 1 %. Тези измервания [21] значително подобряват експерименталните знания за тази молекула и биха могли да бъдат използвани за интерпретацията на астрономически наблюдения от студени звезди или слънчеви петна. Резултатите от експериментите във FeH мотивираха да се направят първите успешни стъпки към изследването на нова важна за астрофизиката молекула – CrH.

Необходимостта да се регистрират слаби преходи от нива с високи ротационни квантови числа, доведе до разработването на нова експериментална постановка. Източникът за производство на метални хидриди бе поставен в резонатор с висок финес, което доведе до многократно увеличаване на ефективната дължина на поглъщане - така наречената cavity ring-down spectroscopy (CDRS) техника. Новата експериментална постановка бе успешно изпробвана за изследване на различни изотопомери на NiH и NiD [22].

Най-съществените резултати от дисертацията са публикувани в следните статии:

- <u>Dobrev</u>, G. and Morville, J. and Tokaryk, D. and Ross, A. J. and Crozet, P., A <u>CRDS</u> sputter-source experiment to study MH radicals : application to NiH and NiD, *Molecilar Physics*, 1–11 (2016), eprint: http://dx.doi.org/10.1080/00268976.2016.1171918
- <u>Dobrev, G.</u>, Gerginov, V. and Weyers, S., Loading a fountain clock with an enhanced low-velocity intense source of atoms, *Physical Review A.*, **93**, 043423 (2016)
- Crozet, P. and Dobrev, G. and Richard, C. and Ross, A. J., Determination of Landé factors in the F⁴Δ_{5/2,7/2} state of ⁵⁶FeH by laser excitation spectroscopy, J. Mol. Spectrosc., **303**, 46–53 (2014)

и бяха представени на следните научни конференции:

- S. Weyers et al. "Improvements of the statistical and systematic uncertainty contributions of PTB's fountain clocks". 30^{-th} European Frequency and Time Forum (EFTF). (Jork, United Kingdom, Apr. 4, 2016–Apr. 7, 2015). presentation.
- V. Gerginov et al. "Improving statistical and systematic uncertainties of PTB's caesium fountain clocks". 8^{-th} Symposium on Frequency Standards and Metrology. (Potsdam, Germany, Oct. 12–16, 2015). poster.
- G. Dobrev et al. "High Sensitivity Laser Spectroscopies Of Metal Hydride Radicals: Laboratory Measurements For Stellar Spectroscopy". 24^{-th} Colloquium on High Resolution Molecular Spectroscopy. (Dijon, France, Aug. 24–28, 2015). poster.
- Crozet et al. "High Sensitivity Laser Spectroscopies of Metal Hydride Radicals". Spectroscopy of exoplanets - Exomol ERC-COST network meeting. (Cumberland Lodge, Windsor, United Kingdom, July 24–26, 2015). poster.

- J. Morville et al. "A new broadband cavity enhanced frequency comb spectroscopy technique using GHz Vernier filtering". 70^{-th} International Symposium on Molecular Spectroscopy (ISMS). (Illinois, United States, June 20–24, 2015). presentation.
- G. Dobrev, V. Gerginov, and S. Weyers. "Improved atom loading for CSF2–PTB primary frequency standard". 576. WE-Heraeus Seminar on Designed Quantum States of Matter. (Bad Honnef, Germany, Dec. 1–5, 2014). poster.
- G. Dobrev et al. "Astrophysique de laboratoire : Spectrométrie laser du radical FeH". Colloque PAMO-JSM. (Reims, France, July 7–10, 2014). poster.
- G. Dobrev et al. "Spectropolarimetry of the FeH molecule in the near-IR". 46^{-th} Conference of the European Group on Atomic Systems (EGAS). (Lille, France, July 1–4, 2014). poster

Библиография

- B. T. Torosov and N. V. Vitanov. "Smooth composite pulses for high-fidelity quantum information processing". *Phys. Rev. A* 83 (2011), p. 053420.
- [2] S. S. Ivanov and N. V. Vitanov. "High-fidelity local addressing of trapped ions and atoms by composite sequences of laser pulses". Opt. Lett. 36 (2011), p. 1275.
- [3] Torosov, B. T. and Guerin, St. and N. V. Vitanov. "High-Fidelity Adiabatic Passage by Composite Sequences of Chirped Pulses". *Phys. Rev. Lett.* 106 (2011), p. 233001.
- [4] G. Dobrev, V. Gerginov, and S. Weyers. "Loading a fountain clock with an enhanced low-velocity intense source of atoms". *Physical Review A*. 93 (2016), p. 043423.
- [5] W. Demtroder. Laser Spectroscopy: Basic Concepts and Instrumentation. 2nd. Springer-Verlag, 1996. ISBN: 9780387571713.
- [6] V. Boyer A. M. Marino R. C. Pooser and P. D. Lett. "Tunable delay of Einstein–Podolsky–Rosen entanglement". *Nature* 457 (2009), pp. 859–862.
- [7] W. M. Itano et al. "Quantum projection noise: Population fluctuations in two-level systems". Phys. Rev. A 47.5 (1993), pp. 3554–3570.
- [8] Cronin, A. D. and Schmiedmayer, J. and Pritchard, D. E. "Optics and interferometry with atoms and molecules". *Rev. Mod. Phys.* 81 (2009), pp. 1051–1129.
- M. Weidemüller and C. Zimmermann. Cold Atoms and Molecules. A Testground for Fundamental Many Particle Physics. WILEY-VCH Weinheim, 2009.
- [10] O. Mandel et al. "Coherent Transport of Neutral Atoms in Spin-Dependent Optical Lattice Potentials". Phys. Rev. Lett 91 (2003), p. 010407.
- [11] A. J. Daley et al. "Quantum Computing with Alkaline-Earth-Metal Atoms". *Phys. Rev. Lett.* 101 (2008), p. 170504.
- [12] David R. Lide, ed. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84th Edition. 84th. CRC Press, June 2003.
- [13] L. Ricci et al. "A compact grating-stabilized diode laser system for atomic physics". *Optics Communications* 117.5–6 (1995), pp. 541–549.
- [14] Houssam Salami and Amanda J. Ross. "A molecular iodine atlas in ascii format". J. Mol. Spectrosc. 233.1 (2005), pp. 157–159.
- [15] N. Afram et al. "The FeH F $^4\Delta$ X $^4\Delta$ system". Astron. Astrophys. 482.2 (2008), pp. 387–395.
- [16] L. Wallace et al. An atlas of the sunspot umbral spectrum in the red and infrared from 8900 to 15050 cm⁻¹ (6642 to 11230 Å). N.S.O. Technical Report 98-002. National Solar Observatory, 1998. URL: ftp://nsokp.nso.edu/pub/atlas/spot3alt.

- [17] M. Dulick et al. "Line Intensities and Molecular Opacities of the FeH F $^{4}\Delta$ -X $^{4}\Delta$ Transition". The Astrophysical Journal 594.1 (2003), p. 651.
- [18] R. Vallon et al. "Room-temperature metal-hydride discharge source, with observations on NiH and FeH". J. Phys. Chem. A 113.47 (2009), pp. 13159–13166.
- [19] I. Bozhinova et al. "Discharge tube with coaxial geometry for efficient production of metal hydrides". *Review of Scientific Instruments* 84.9 (2013), p. 093107.
- [20] D. A. Fletcher et al. "The green system of FeH recorded at ambient temperatures". J. Chem. Phys. 93.12 (1990), p. 9192.
- [21] P. Crozet et al. "Determination of Landé factors in the F ${}^{4}\Delta_{5/2,7/2}$ state of 56 FeH by laser excitation spectroscopy". J. Mol. Spectrosc. 303 (2014), pp. 46–53.
- [22] G. Dobrev et al. "A CRDS sputter-source experiment to study MH radicals: application to NiH and NiD". Molecular Physics (), pp. 1–11. eprint: http://dx.doi.org/10.1080/00268